

高じん性セメント複合材料を用いたコンクリート構造物の リハビリテーション手法の開発

上田 隆雄^{1*}

Development of a Rehabilitation Method for Concrete Structures Using the Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite

by
Takao UEDA

Electrochemical corrosion control methods have been applied to concrete structures deteriorated by steel corrosion in concrete. By means of these methods, corrosion control effect can be expected, but the improvement of mechanical performances or prevention of dropping of concrete pieces can't be gained. From such background, experimental investigation was carried out in order to clarify the possibility of a new electrochemical rehabilitation method, in which the ductile fiber reinforced cementitious composite bonding and covering the anode material on the concrete surface was used for improving the mechanical performances of the deteriorated structures. As the results of this study, bending strengthening effect was confirmed by the flexural bending test of reinforced concrete specimens applying the proposed method.

Key words: HPFRCC, Electrochemical Corrosion Control Method, Strengthening Effect

1. はじめに

鉄筋腐食によるコンクリート構造物の劣化に対して、環境条件や劣化程度が厳しいために従来型のライニング工法や断面修復工法では対処が困難と判断されるケースでは、電気防食工法や脱塩工法などの電気化学的防食工法が検討される事例が増加している。電気化学的防食工法はほぼ確実に鉄筋防食効果を挙げることができる工法であるが、劣化の程度が深刻で構造物としての力学的性能が低下している場合や、コンクリートの剥落が懸念される場合には、力学的性能を向上させ

るための補強工法や、かぶりコンクリートの剥落防止工法などを併用させる必要がある。

一方、コンクリート構造物の耐久性能の向上が可能な高性能補修・補強材料として複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(HPFRCC)が注目されている。本材料はセメントモルタルに高性能有機短繊維を混入した材料で、ひび割れ発生後も応力の低下が見られないひびずみ硬化特性や、微細ひび割れが分散する特徴がある。セメント系材料であるHPFRCCは樹脂系の絶縁材料と異なり、導電性が確保できることから、通電処理を行う電気化学的防食工法との組み合わせにより、相乗効果が期待できる。

そこで本研究では、電気化学的防食工法の陽極材をコンクリート表面に接着し、被覆する材料としてHPFRCCを用いることで、防食効果に加えて曲げ補強効果が期待できる工法の可能性を明らかにすることを目的として実験的検討を行った。なお、HPFRCC自身

¹ 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門

Department of Civil Engineering, Institute of Technology and Science, Graduate School of Engineering, The University of Tokushima

*連絡先：〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1

Table 1 Mix proportion of concrete for RC beam specimen

W/C (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	Unit mass (kg/m ³)						
			C	W	S	G	NaCl	WRA	AEA
55	46	15	318	175	796	946	13.2	0.3	0.02

Table 2 Mix proportion of HPFRCC

Name of Fiber	W/B (%)	S/C	Vf (%)	No.	Unit mass (kg/m ³)						
					C	W	S	FA	Fiber	HVA	SPA
PVA	37	0.5	1.5	V37	817	378	409	204	19.5	0.756	1.02
	45	0.5	1.5	V45	750	422	375	188	19.5	0.844	0.937
PE	37	0.5	1.5	E37	819	379	410	205	15	0.758	1.02

の基本的物性についても併せて検討を行った。

2. 実験概要

2.1 RC はり用コンクリートおよび HPFRCC の配合

本実験で作製したRCはり供試体のコンクリートの示方配合をTable 1に、陽極システムに用いたHPFRCCの示方配合をTable 2に、HPFRCCに混入した2種類の繊維の基本諸元と物性値をTable 3に示す。Table 1に示したように、RCはりのコンクリート（28日圧縮強度：46.5 N/mm²）は、厳しい鉄筋腐食環境を想定し、Cl⁻量が8.0 kg/m³となるようにNaClを練混ぜ水に溶解して混入した。

HPFRCCの配合条件は既往の検討¹⁾を参考にして決定した。水結合材比（W/B）は45%と37%の2レベルを設定した。なお、ここで結合材とは、セメントとフライアッシュ（結合材全質量の20%置換混入）を合わせたものとする。繊維体積率（Vf）は1.5%、S/Cは0.5で一定とした。セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm³、比表面積：3280 cm²/g）、フライアッシュはJIS A 6201で規定された種フライアッシュ（密度：2.35 g/cm³、比表面積：3700 cm²/g、SiO₂：56.9%、強熱減量：1.6%）を用い、細骨材は7号珪砂（密度：2.59 g/cm³）を用いた。また、セルローズ系の増粘剤（HVA）を単位水量の0.2%、ポリカルボン酸系高性能AE減水剤（SPA）を単位粉体量の0.1%添加した。

2.2 供試体の作製および通電処理

RC はり供試体の母材コンクリート部分は100×80×400 mmとし、かぶり20 mmで鉄筋D10 SD295Aを1本配した。母材コンクリート打設後に、HPFRCC 陽極層を接着する打設面に硬化遅延剤を噴霧することで表層のペースト部分を除去し、粗骨材を露出させた状態で8週間の封緘養生を行った。養生終了後、通電面と

Table 3 Properties of fibers

Fiber	Length (mm)	Diameter (μm)	Tensile strength (N/mm ²)	Young's modulus (N/mm ²)
PVA	12	40	1600	4.0 × 10 ⁴
PE	12	12	2500	8.8 × 10 ⁴

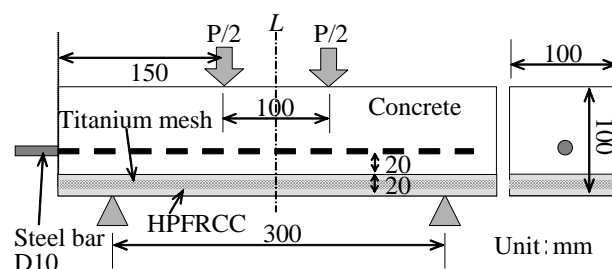


Fig. 1 Outline of RC beam specimen

なる打設面にチタンメッシュを含む厚さ20 mmのHPFRCC陽極層を接着した（Fig. 1参照）。その後さらに4週間の封緘養生を行い、通電処理を実施した。通電処理は脱塩工法の標準レベルを想定し、電流密度はコンクリート表面に対して1.0 A/m²、通電期間は8週間とし、供試体を電解液である0.1NのLi₃BO₃溶液中に浸漬して行った。なお、電流を供給しない無通電供試体は上記の8週間、湿空環境で保管した。また、比較用にHPFRCC陽極層を接着しない無補強供試体（100×100×400 mmでかぶり40 mmで鉄筋配置）も作製し、他の無通電供試体とともに保管した。

RC はり供試体の他にHPFRCC供試体として圧縮試験用に100×200 mmの円柱、曲げ試験用に100×100×400 mmの角柱供試体を各配合3体ずつ作製した。これらの供試体は打設日翌日に脱型し、20℃の恒温室で

28 日間の水中養生を行った後に、各種試験を実施した。

2.3 通電処理前後の試験

RC はり供試体の通電処理前後に鉄筋の自然電位を測定し、通電処理終了後に、静的曲げ載荷試験、HPFRCC 陽極層の接着強度試験と、コンクリート中の Cl^- 濃度分布測定を行った。

自然電位測定時の照合電極は飽和銀塩化銀電極 (Ag/AgCl) を使用した。接着強度試験は、建研式の接着強度測定装置、静的曲げ載荷試験は 2000 kN 容量の万能試験機を用いて行った。曲げ載荷試験は Fig. 1 のように 3 等分点載荷とし、荷重とスパン中央変位、はり底面 HPFRCC 層のひずみ分布を測定するとともに、型ゲージ (基長 50 mm、容量 2 mm) を 3 個連ねて曲げスパンのひび割れ幅を測定した。なお無筋の HPFRCC 供試体についても同様に、3 等分点載荷とし、荷重とスパン中央変位を測定した。コンクリート中の Cl^- 濃度分布を測定する供試体は、はり中央部分の通電面から深さ方向に幅 10 mm のプレートを切出し、各プレートの全塩分濃度を JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に準じて測定した。

3. HPFRCC の基礎的性状

各種 HPFRCC のフレッシュ時における試験結果と材齢 28 日における圧縮強度の一覧を Table 4 に示す。Table 4 によると、繊維の種類では PVA 繊維を用いた V37 や V45 と比較して PE 繊維を用いた E37 はフロー値が小さく、流動性が低下している。これは、Table 3 に示したように、PE 繊維の方が繊維径が小さいことから、練混ぜ水の拘束効果が大きかったものと考えられる。実際に練り上がり後の E37 は硬く、型枠に充填する際の流動性も悪い状態であったため、PE 繊維を用いる場合には配合の修正が必要であろう。

著者らが行った HPFRCC の基礎的物性に関する過去の検討²⁾では、10%以上の大きな空気量が測定され、圧縮強度が 20 N/mm^2 程度の小さな値にとどまる傾向を示した。これを改善するために、本実験では増粘剤添加量を低減し、練混ぜ時における気泡の巻込みを防ぐことを試みた。この結果、空気量が低減し、圧縮強度も増加した。W/B が 37%の場合に、E37 よりも V37 の方が大きな圧縮強度を示しているのは、前述したように、E37 の流動性が良好とは言えない状態であったことが影響している可能性がある。

HPFRCC 供試体の曲げ載荷試験で得られた荷重 - 中央変位曲線を Fig. 2 に示す。今回作成した HPFRCC 供試体はすべて約 10kN で曲げひび割れ発生後も荷重と

Table 4 Fresh properties and 28 days' strength

Name of mixture	Table flow (mm)	Air (%)	28 days' strength (N/mm^2)
V37	150	6.0	65
V45	197	8.0	45
E37	110	3.5	54

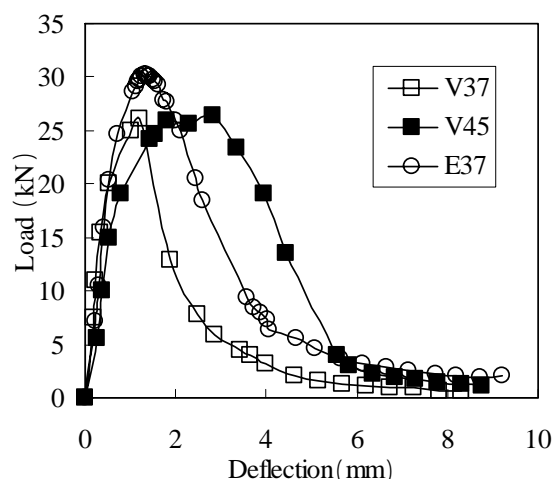


Fig. 2 Bending load-deflection curves of HPFRCC specimens

中央変位が増加するたわみ硬化性を示した。また、Fig. 2 より最大荷重後の荷重低下も緩やかであり大きな曲げじん性が得られていることがわかる。得られた曲げじん性は配合条件によって異なり、V37 の曲げじん性は比較的小さくなっている。HPFRCC が大きな曲げじん性を得るためには、曲げひび割れを跨いだ短繊維がモルタルマトリックスから徐々に引抜けつつひび割れの進展に抵抗する架橋効果が発揮される必要がある。これに対して V37 の場合は、PVA 繊維の引張強度に対してモルタルマトリックスの強度が大きすぎたために、ひび割れを跨いだ PVA 繊維がモルタルマトリックスから引抜けずに破断したことで曲げじん性が小さくなったものと考えられる。PE 繊維は PVA 繊維よりも高強度である一方、引抜けに対する付着力は PVA 繊維に劣ることが指摘されている¹⁾。これに対して、E37 は高強度のモルタルマトリックスによって PE 繊維の引抜けを抑えることで繊維の高引張強度が有効に利用され、V37 より大きな曲げじん性が得られたものと考えられる。微細ひび割れの発生が顕著に多かったのは、V45 であった。Fig. 2 から V45 は他の配合よりも大きな曲げ

ん性を発揮している。これは、付着力が大きいという PVA 繊維の特性が発揮された結果と考えられる。

4. HPFRCC 陽極層を接着した RC はり供試体

通電処理を実施した RC はり供試体に関して、通電処理前後の各種試験結果を以下に示す。なお、通電供試体の凡例は配合記号の前に D，無通電供試体は N を付けて表すことにする。

4.1 通電状況

すべての供試体において、通電処理に伴う外観上の変化は見られなかった。8 週間の通電処理期間中における、陽極材(チタンメッシュ)と供試体中鉄筋との電位差の経時変化を Fig. 3 に示す。これによると、陽極層に用いた HPFRCC の配合種類に関わらず、通電期間中も HPFRCC 中においてセメントの水和反応が進行し、細孔組織が緻密化することで電気抵抗が上昇したために、所定の電流供給に要する電位差が上昇したことが原因と推察される。

4.2 コンクリート中鉄筋の自然電位

通電処理前後における供試体中の鉄筋自然電位を Table 5 に示す。これより、通電処理前の自然電位は -0.35 V vs Ag/AgCl 程度を示しており、ASTM C876-91 の判定基準を参考にすると、鉄筋は腐食状態にあると判定できる。これは、今回作製した供試体には 8.0 kg/m^3 という、発錆限界を大幅に上回る Cl^- を混入しているためである。一方、通電処理後は陽極層に用いた HPFRCC の種類によらず、-1.0 V vs Ag/AgCl 程度の値を示している。この電位レベルは一般に鉄の不活性域と考えられており、いずれの供試体にも同程度の防食電流が供給されたといえる。

4.3 コンクリート中の Cl^- 濃度分布

通電処理後の供試体中における Cl^- (全塩分)濃度分布を Fig. 4 に示す。横軸は供試体中の位置で 0 mm が通電表面であり、HPFRCC 陽極層が 20 mm、さらに 20 mm のコンクリートかぶりを経て鉄筋が配置されている。Fig. 4 より、HPFRCC 陽極層中における暴露表面から 1 ~ 2 cm 範囲の Cl^- 濃度が大きくなっている。これは、陽極材であるチタンメッシュが HPFRCC 内に接着されているからである。また、HPFRCC の配合によらず、陰極であるコンクリート中の鉄筋付近を中心に脱塩効果が得られていることがわかる。鉄筋近傍部分の Cl^- 量は 2.0 kg/m^3 程度まで減少していることから、初期混入 Cl^- 量の 8.0 kg/m^3 に対して鉄筋位置の脱塩率は 75% 程度と計算できる。この値は陽極材を接着しない従来

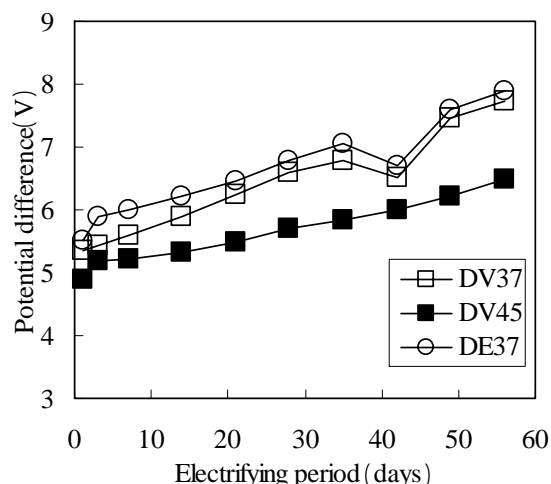


Fig. 3 Potential difference between anode and steel bar

Table 5 Half-cell potential of steel in specimens before and after the treatment (V vs Ag/AgCl)

	DV37	DV45	DE37
Before	- 0.359	- 0.356	- 0.390
After	- 1.059	- 1.043	- 1.059

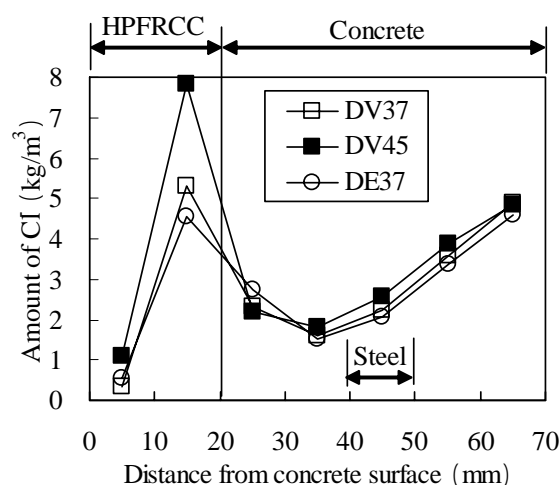


Fig. 4 Distribution of total chlorides in specimens just after the treatment

型のデサリネーションで得られた既往の検討結果³⁾と同程度である。

4.4 HPFRCC 陽極層の接着強度試験

HPFRCC 陽極層と母材コンクリートとの接着強度試験結果を Fig. 5 に示す。図より、無通電供試体は HPFRCC 陽極層の配合によらず、 1.0 N/mm^2 を上回る接

着強度が得られているのに対して、通電供試体の接着強度は、無通電供試体の場合と比べて低下している。破壊形態も、無通電供試体は、母材コンクリートが部分的に破壊していたのに対して、通電供試体で母材コンクリートが破壊したのは E37 のみであり、他の配合は HPFRCC 陽極層接着界面で剥離する場合が多く見られ、中にはチタンメッシュ層で剥離した供試体もあった。

このような通電処理による接着強度の低下は、HPFRCC 中に埋込まれたチタンメッシュにおけるアノード反応の影響で、HPFRCC 層や、HPFRCC 層とコンクリートとの界面が変質したことが原因と推測できるが、メカニズムの詳細については、今後の検討で明らかにしたい。

4.5 曲げ載荷試験

RC はり供試体の静的曲げ載荷試験によって得られた荷重 - スパン中央変位曲線を Fig. 6 に示す。上図が無通電供試体、下図が通電供試体の結果をまとめており、各図において HPFRCC 陽極層を接着していない無補強（無通電）供試体を比較として示している。今回用意した供試体はせん断補強筋を配さなかったため、最終的にせん断ひび割れの進展により破壊した。本工法による曲げ補強効果を明確にするためには、今後、曲げ破壊型の供試体による検討が必要で

ある。Fig. 6 によると、無補強供試体はスパン中央変位が 1 mm 程度で鉄筋が降伏し、4 mm 程度で最大荷重を記録した後はせん断ひび割れの進展に伴って荷重が低下している。これに対して、HPFRCC 陽極層を接着した供試体は初期剛性が低下することなく、無補強供試体の降伏荷重を超える最大荷重を示しており、曲げ補強効果が確認できる。これは、HPFRCC 層がコンクリート中の鉄筋に加えて引張応力を負担していることを示していると言える。また、特に V45 あるいは E37 の HPFRCC を接着した供試体については、最大荷重に達した後も、緩やかに荷重が低下し、HPFRCC 陽極層がせん断ひび割れの急激な進展に抵抗していることがわかる。ただし、通電処理を行った場合（下図）には、無通電の場合（上図）よりも最大荷重後の荷重低下勾配が大きい。これは、Fig. 5 に示した通電処理に伴う接着強度の低下が RC はりとしての曲げじん性の低下につながったものと考えられる。

一方、V37 を接着した供試体は通電処理の有無によらず、無補強供試体よりも小さな変位で荷重が低下しており、曲げじん性は小さい。この配合は Fig. 5 に示したように、通電処理による接着強度の低下程度が最も大

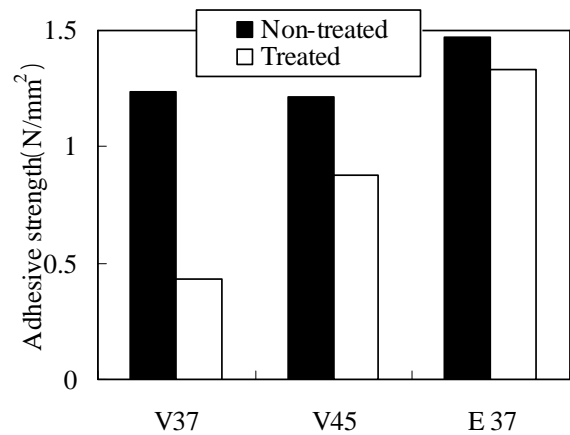


Fig. 5 Results of adhesive strength test

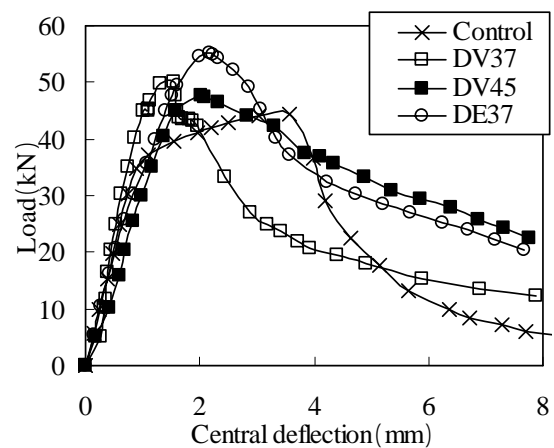
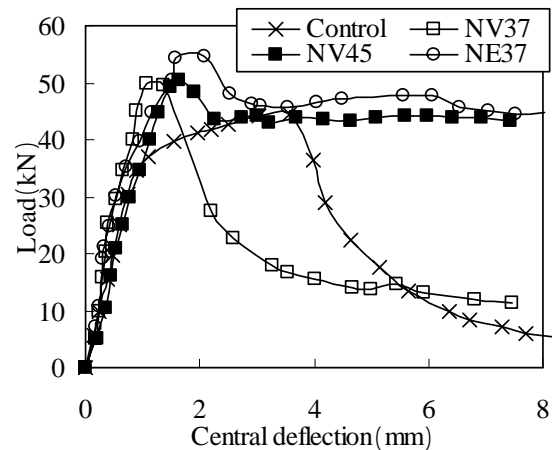


Fig. 6 Bending load-central deflection curves of RC beam specimens

きかったことから、他の配合に比べて母材コンクリートとの一体性が低かった可能性が高い。

荷重と型ゲージにより測定した最大ひび割れ幅の関係を Fig. 7 に示す。これより、20 kN の載荷段階で

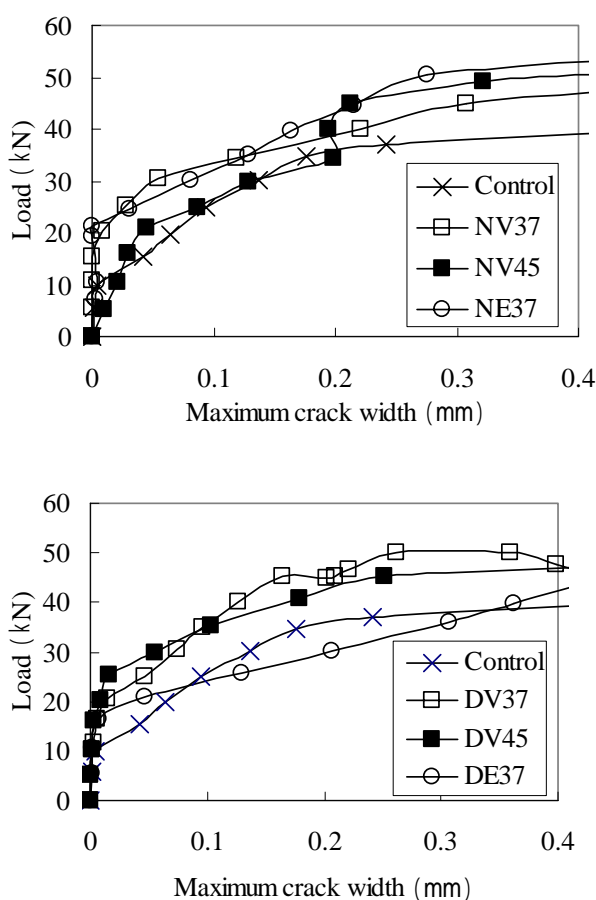


Fig. 7 Tensile load-maximum crack width curves

較すると、無補強供試体のひび割れ幅は0.1 mm 程度に達しているのに対して、HPFRCC 陽極層を接着した供試体はほとんどひび割れが開口していない。さらに、ひび割れ開口後も同一荷重に対するひび割れ幅を抑制している。これは、HPFRCC 陽極層において微細なひび割れが分散することで、局所的なひび割れの開口を防いだためと考えられる。

5. まとめ

本研究結果をまとめると次のようになる。

- (1) 本研究の配合条件では、PVA 繊維を混入した HPFRCC は W/B が 37% の場合より 45% の場合の方が大きな曲げじん性を示し、W/B が 37% の場合と比較すると、PVA 繊維より PE 繊維の方が大きな曲げじん性を示した。
- (2) 本研究で提案した工法による通電処理を実施した結果、鉄筋近傍のコンクリートからの脱塩量は、従来型のデサリネーションで得られる脱塩量と同程度であった。また、供試体中の鉄筋電位から、鉄筋に防食電流が供給されていることが確認された。
- (3) 通電処理により、HPFRCC 陽極層と母材コンクリートとの接着強度が低下した。
- (4) HPFRCC 陽極層を接着した供試体は無補強の場合に比べ、曲げ最大荷重や曲げじん性が増加したが、その効果は通電処理により低下した。また、PVA 繊維を混入した W/B が 37% の HPFRCC を接着した場合は、曲げじん性の低下が顕著であった。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書（ ），2004.
- 2) 稲岡和彦，上田隆雄，水口裕之：配合条件が高じん性セメント複合材料の基礎的物性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp. 287-292 (2006).
- 3) 上田隆雄，庄野 秀，芦田公伸，宮川豊章：CFRP 複合電極を用いたデサリネーションに関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp. 1493-1498 (2003).